

基于多步长梯度特征的红外弱小目标检测算法

万 明¹ 张凤鸣¹ 胡 双²

(¹ 空军工程大学工程学院, 陕西 西安 710038)
(² 软件工程职业技术学院, 湖北 武汉 430000)

摘要 针对低信噪比红外图像中弱小目标检测难的问题,在分析红外弱小目标各向梯度特征的基础上,提出了一种新的红外弱小目标检测算法。该算法基于红外弱小目标各向梯度均快速下降的特征,首先根据目标大小在待检测点上、下、左、右选取 4 个参考点,根据多步长下待检测点与参考点之间的最大梯度特征,判定潜在目标;然后通过连续 3 帧检测信息的融合,确定最终目标。该算法无需预测背景,计算简单,可在低信噪比、强度变化剧烈的图像中有效检测弱小目标。实验结果表明了算法的有效性。

关键词 成像系统;红外搜索与跟踪;目标检测;多步长梯度;信息融合;弱小目标

中图分类号 TP391 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.1011001

Novel Infrared Dim and Small Target Detection Algorithm Based on Multi-Scale Gradient

Wan Ming¹ Zhang Fengming¹ Hu Shuang²

(¹ Institute of Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710038, China)
(² Software Engineering Technical College, Wuhan, Hubei 430000, China)

Abstract To detect dim and small target in infrared image with low signal-to-noise ratio, a novel algorithm based on multi-scale gradient of gray level is presented. Firstly, for all points in an image, the algorithm selects up, down, left and right reference points around the current point according to the size of target, and identifies potential targets based on the maximum gradients between current point and reference points. Then, final targets are identified with the fusion of potential target detection results of the three sequential images. The algorithm does not need background prediction, and achieves not only higher detection rate but also lower false alarm rate in infrared image with low signal-to-noise ratio and complex background. Experimental results show the validity of the algorithm.

Key words imaging systems; infrared search and track; target detection; multi-scale gradient; information fusion; dim and small target

OCIS codes 110.3080; 070.5010; 100.3008; 200.4560

1 引 言

红外搜索与跟踪系统以其被动工作方式、抗干扰性强、分辨率高等特点,广泛应用于目标探测与跟踪。然而在远距离情况下,目标成像面积小,缺乏结构纹理特征,同时目标的信号强度也很弱,极易淹没背景杂波中^[1]。为有效提高红外搜索与跟踪系统的探测距离,保证较高的检测率和较低的虚警率,国内外众多学者提出了许多有意义的检测算法,如针对单帧图像的盒式滤波器算法^[2]、最大中值滤波器

方法^[3]、最大化背景模型方法^[4]、二维最小均方滤波器算法^[5,6]、形态学滤波算法^[7,8]、小波变换算法^[9,10]等,以及针对图像序列的图像帧差分法^[11]、最小一乘算法^[12]、光流估计方法^[13,14]和特征选择性滤波^[15]等。然而许多算法或者对目标或背景有特殊要求,或者在计算量方面有待改善才能满足实际工程应用的可靠性、实时性需求。例如有的需要用滤波器扫描整幅图像,有的需要先预测背景再计算残差图像,有的需要计算整幅图像的均值和标准差,其

收稿日期: 2011-03-31; 收到修改稿日期: 2011-05-07

基金项目: 国防预研基金(9140A17020307JB3207)资助课题。

作者简介: 万 明(1979—),男,博士,讲师,主要从事机载预警与探测技术等方面的研究。E-mail: afwanming@163.com

计算量均较大,限制了目标检测的处理速度;有的算法在消除背景的同时,也会造成目标的丢失;有的算法在预测背景过程中,不仅突出了目标像素,同时也突出了背景像素,造成较高的虚警率。

本文提出了一种简单实用的检测算法。该算法以目标像素和背景像素的灰度梯度为基础,通过目标的局部梯度特征构造目标像素点检测算法,并对检测结果进行融合确认。这种算法构造简单、计算量小,同时又可在强度变化剧烈的背景下有效检测目标。

2 目标灰度梯度特征分析

红外图像可认为是由目标、背景和噪声三部分组成的,即

$$f(x, y, k) = f_B(x, y, k) + f_T(x, y, k) + f_N(x, y, k), \quad (1)$$

式中 $f_B(x, y, k)$, $f_T(x, y, k)$ 和 $f_N(x, y, k)$ 分别表示背景、目标和噪声; (x, y) 表示像素点坐标; k 为图像帧序号。图像的灰度等级均分为 0~255。

红外弱小目标是指与背景灰度对比度较低,且几何尺寸较小的目标。红外图像中弱小运动目标在成像面上可能只有一个或几个像素的大小,通常认为不大于 6 pixel×6 pixel,或总像素个数不超过 30 个^[11,12,16]。目标的几何尺寸小到无法提取任何形状信息,通常只是一个亮点或亮斑,可利用的目标检测信息通常仅包括其灰度和运动信息。

红外图像的背景主要是大面积缓慢变化的低频成分。例如云、山、海面、船只和建筑物等,在空间上往往呈大面积的连续分布状态,在红外辐射的强度上也呈渐变过渡状态,从而使得背景红外图像在图像灰度空间分布上具有较大的相关性。

图 1 上部为某原始红外图像的一部分,天空背景中包括一个目标及云层,下部为目标所在行的灰

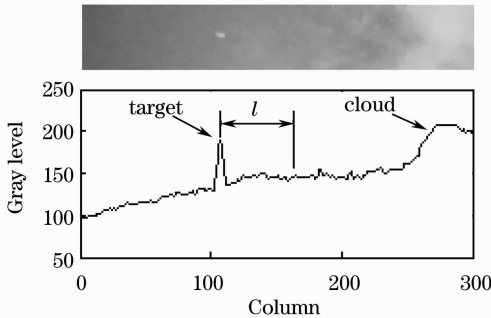


图 1 灰度梯度特征

Fig. 1 Gradient feature of gray level

度变化曲线。从图 1 中可以看出,弱小目标与云层等杂波边缘在灰度梯度上的差别在于:前者在左、右两侧均具有较高的梯度,而后者仅在一侧具有较高的梯度。此外,人眼对于目标的检测仅根据目标所在局部的灰度特征进行,而与全局灰度分布无关。虽然目标的灰度级低于云层的灰度级,但目标在图像中仍然清晰可辨。将对图 1 的分析扩展到二维图像中,可认为目标与云层等背景不同之处在于目标与周围局部背景的灰度值均具有显著差别,即各向梯度值较大。

红外成像系统的成像质量远远比不上可见光成像系统的成像质量,主要因为红外成像系统的分辨率较低,且红外成像系统的噪声要远大于可见光成像系统。定义信噪比(信杂比)为

$$R_{SN} = \alpha^2 / \sigma^2, \quad (2)$$

式中 α 为目标灰度与背景灰度之间的偏差; σ^2 表示图像背景灰度的方差。

3 目标检测算法

3.1 算法框架

根据以上分析,构造一种利用局部梯度特征检测红外弱小目标的新算法。算法流程如图 2 所示,其中 $f(x, y, k)$ 为原始图像, $f_P(x, y, k)$ 为初步检测出的潜在目标的图像, $f_T(x, y, k)$ 为最终目标检测图像。算法分为两个步骤:首先根据目标灰度的局部梯度特征确定潜在目标像素,目的是剔除较大的背景像素;然后对连续三帧的潜在目标检测结果进行融合处理,确定最终的目标像素。

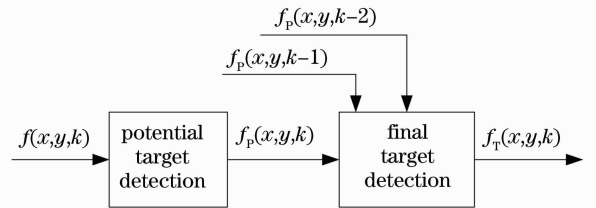


图 2 目标检测算法框架

Fig. 2 Framework of the target detection algorithm

3.2 潜在目标的检测

目标在红外图像中具有全向梯度特征,因此可根据该特征实现目标的检测。在潜在目标的检测过程中,梯度步长 l 的确定对于检测的效果非常重要。如果图 1 中 l 的最大值太小,则被检测点与参考点有可能均为目标像素,造成目标的丢失;而如果其值太大,则容易将小块的突出背景也识别为目标,造成虚警。理论上 l 的最大值应大于目标的大小,且小

于背景的大小。根据本文中弱小目标不大于 $6 \text{ pixel} \times 6 \text{ pixel}$ 的定义,可采用步长 $l=1, \dots, 6$ 识别潜在目标。

在单帧图像中,定义待检测点与参考点之间的梯度为

$$g(x, y, \Delta x, \Delta y, k) = f(x, y, k) - f(x + \Delta x, y + \Delta y, k), \quad (3)$$

式中 (x, y) 为待检测点坐标; $\Delta x, \Delta y$ 分别为参考点与待检测点的坐标差。为减少计算量,可在待检测点周围上、下、左、右 4 个方向选择 4 个参考点,记作

$$\begin{cases} g_u(x, y, k) = \max_{l=1, \dots, 6} g(x, y, 0, -l, k) \\ g_d(x, y, k) = \max_{l=1, \dots, 6} g(x, y, 0, l, k) \\ g_l(x, y, k) = \max_{l=1, \dots, 6} g(x, y, -l, 0, k) \\ g_r(x, y, k) = \max_{l=1, \dots, 6} g(x, y, l, 0, k) \end{cases}, \quad (4)$$

式中 g_u, g_d, g_l, g_r 分别表示待检测点上、下、左、右 4 个方向上的灰度梯度; l 为梯度步长。 g_u, g_d, g_l, g_r 的计算可能出现几种情况:

1) 若 g_u, g_d, g_l, g_r 均较小,说明待检测点处于图像中较平坦或较暗部分,可认为该像素点为背景点;

2) 若 g_u, g_d, g_l, g_r 均较大,说明待检测点是图像中的凸点且凸起的幅度较大,此时可认为该点为目标像素点;

3) 若 g_u, g_d, g_l, g_r 部分较大,部分较小,则可认为待检测点为某较大背景物体的边缘,此时可认为待检测点为背景像素。

根据以上分析,可构造潜在目标像素点提取算法如下:

$$f_P(x, y, k) = \begin{cases} 1, & \text{if } \min\{g_u, g_d, g_l, g_r\} \geq t_h \\ 0, & \text{else} \end{cases}, \quad (5)$$

式中 t_h 为潜在目标像素点分割的阈值,其值理论上应大于背景的灰度梯度变化,且小于目标与背景的灰度差。由于缺乏关于背景和目标的先验知识,因此 t_h 的值通常根据经验确定。本文实验部分将对 t_h 的取值做进一步分析。

设 $f_R = \min\{g_u, g_d, g_l, g_r\}$, 则计算 f_R 的目的实际上是用一个非线性局部滤波器滤除背景。为说明其效果,对图 1 上部图像计算 f_R , 结果如图 3 所示,其中目标中心点在原图中的坐标位置为 $(25, 107)$ 。可见基于多步长梯度特征,该滤波器不仅有效消除了背景像素,而且较好地保留了目标像素凸起的幅度和宽度。

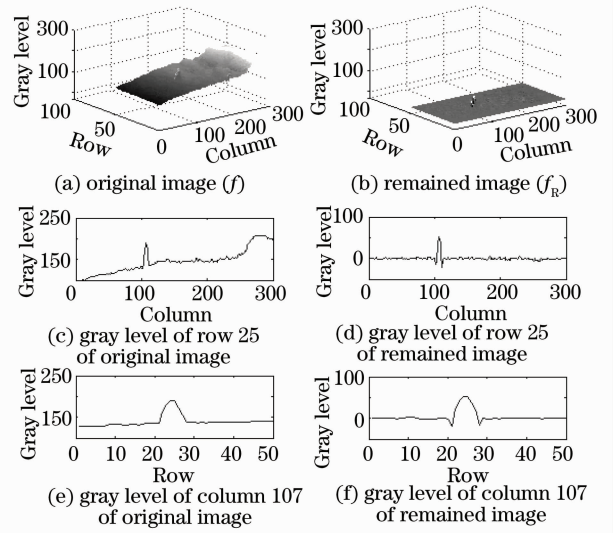


图 3 背景滤除效果

Fig. 3 Effect of background removal

需要指出的是,在单帧图像中,点状噪声与目标均具有全向梯度快速下降特征。潜在目标检测算法虽然能够有效剔除缓变背景杂波,但并不能剔除与目标具有相似空间灰度梯度特征点状噪声,因此对于后者需要做进一步处理。

3.3 最终目标的融合确认

在图像帧序列中,通常认为目标在相邻帧中出现的坐标位置是相关的,而噪声并不具有该特征。当红外成像系统的移动较小时,由于红外弱小目标与成像系统较远,此时可认为目标在成像面上的移动较小,在图像帧序列上具有缓变的空间相关性。假设在相邻帧中,目标的移动不大于 r 个像素。令

$$\theta(x, y, k - \sigma) = \max_{-\sigma \leq i \leq \sigma, -\sigma \leq j \leq \sigma} f_P(x + i, y + j, k - \sigma) \quad (6)$$

表示第 $k - \sigma$ 帧图像的相邻区域中是否出现过潜在目标,其取值为 0 或 1。采用三次确认法确认最终的目标,则最终目标的确定算法为

$$f_T(x, y, k) = \begin{cases} 1, & \text{if } \prod_{\sigma=0}^2 \theta(x, y, k - \sigma) = 1 \\ 0, & \text{else} \end{cases}. \quad (7)$$

对于图像序列的第 1 帧,需令 $f_P(x, y, 0) = 1$, $f_P(x, y, -1) = 1$ 。

4 实验结果与分析

为验证本文算法的有效性,分别使用仿真图像和实际图像进行了测试。

4.1 仿真图像实验

仿真图像如图 4(a)所示,其中所有像素的灰度级均为 100(较暗处)或 200(较亮处)。图 4(a)中部为较大方块,用于模拟大背景物体,如云层等;上部从左至右依次为 $1 \text{ pixel} \times 1 \text{ pixel}$, $2 \text{ pixel} \times 2 \text{ pixel}$, \dots , $6 \text{ pixel} \times 6 \text{ pixel}$ 大小的模拟目标,用于测试算法在较平缓的图像局部能否检测出目标;下部依次为 $1 \text{ pixel} \times 1 \text{ pixel}$, $2 \text{ pixel} \times 2 \text{ pixel}$, \dots , $6 \text{ pixel} \times 6 \text{ pixel}$ 大小的模拟目标,与大方块的像素距离为 1 pixel ,用于测试边缘处的潜在目标检测效果。

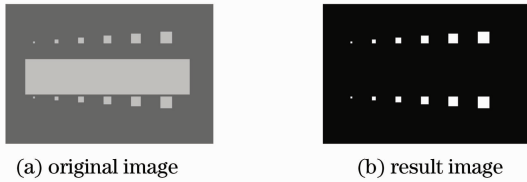


图 4 仿真图像检测结果

Fig. 4 Potential target detection result of simulated infrared image

图 4(b)为 $t_h = 25$ 时的测试结果。从结果中可以看出:

- 1) 在平缓的图像局部,算法能有效检测像素不大于 $6 \text{ pixel} \times 6 \text{ pixel}$ 的目标,且不丢失像素;
- 2) 对于大背景边缘处的目标,算法仍可识别目标像素,且避免了目标像素的丢失。

4.2 实际图像实验

为进一步验证本文算法的有效性,选择了 3 组长波红外热像仪拍摄的帧频为 25 frame/s 的红外图像序列进行实验。实验用 CPU 为 PC8548E,主频为 400 MHz ,内存大小为 32 MB ,算法在 VxWorks 环境下用 C 语言编程实现,相应的计算参数均为 $t_h = 25$, $r = 2$ 。测试结果如图 5 所示,其中左侧为原始图像序列的第 3 帧,右侧为该帧的检测结果。

图 5(a)图像大小为 $200 \text{ pixel} \times 300 \text{ pixel}$,图中有 1 个目标(飞机,最大灰度级为 189),背景包含云层,且云层与空背景之间的灰度变化较为强烈(灰度级范围为 $79 \sim 214$),信噪比为 0.67。图 5(b)为采用本文算法计算得到的目标像素,可有效抑制和去除碎云移动的影响,从而保证检测结果的准确性。

图 5(c)图像大小为 $200 \text{ pixel} \times 300 \text{ pixel}$,图中有 1 个目标(飞机,最大灰度级为 168),背景包括海天线、船只(背景灰度级范围为 $32 \sim 187$),信噪比为 4.23。采用本文算法得到的结果如图 5(d)所示,准确检测出了弱小目标。

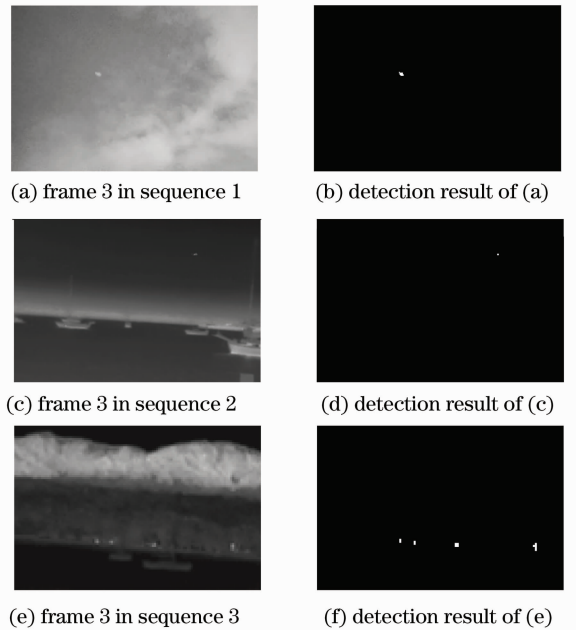


图 5 实际红外图像检测结果

Fig. 5 Target detection results of real infrared image sequences

图 5(e)图像大小为 $120 \text{ pixel} \times 80 \text{ pixel}$,图中有 4 个目标(均为车辆,最大灰度级分别为 126, 121, 110 和 134),其背景包括海面,山和较多的船只(灰度级范围为 $20 \sim 196$),信噪比为 0.83。采用本文算法得到的结果如图 5(f)所示,可有效去除山和船只的强干扰,从而保证了检测结果的准确性。

需要指出的是,序列 1,3 的信噪比均小于 1,但并不影响目标的检出。这是由于图像的信噪比是根据全局灰度计算的,而本文中目标能否被检出依据的是目标的局部灰度特征,与全局灰度分布无关。

对于图 5(a)所示实例的 200 frame 连续图像(每帧包含 1 个真实飞机目标)进行测试,分割阈值 t_h 的值从 5 变化至 100,统计目标检测率和虚警率,如图 6 所示。从结果曲线可以看出:

- 1) t_h 值的选择对图像的虚警率和检测率有较大影响,随着 t_h 值的增加,虚警率和检测率均呈下降趋势直至为 0。因此,实际工程中应选择适当的 t_h 值以满足检测率和虚警率的要求。

2) 当 t_h 值较小时,由于图像中虚假目标较多且像素间隔较小,因此融合处理对虚警率的贡献不大;随着 t_h 值的增加,虚假目标个数明显减少,此时融合处理的效果较好。

对于图 5(a)所示实例的 200 frame 连续图像,分别采用图像帧差分算法(记为 DIF)、盒式滤波器算法(记为 BF,内窗大小为 $6 \text{ pixel} \times 6 \text{ pixel}$,过渡区

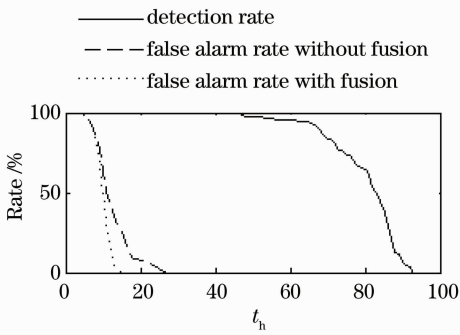


图 6 t_h 值对检测率和虚警率的影响

Fig. 6 Detection rate and false alarm rate with respect to t_h

为 1 pixel、外窗大小为 8 pixel×8 pixel)、最大中值滤波器算法(记为 MMF, 滤波窗口大小为 3 pixel×3 pixel)、二维最小均方滤波器算法(记为 TDLMS, 滤波窗口大小为 3 pixel×3 pixel, 自适应步长 $\mu=0.01$)、形态学滤波算法(记为 Morphologic, 采用 6 pixel×6 pixel 模板)、小波变换算法(记为 Wavelet, 采用 1 次 Haar 小波变换)以及本文算法(记为 MSG, 参数 $t_h=30, r=2$)进行目标检测, 除本文算法之外, 其余算法的自适应分割阈值参数 λ 均为 3。算法检测性能的统计结果如表 1 所示(各性能参数为均值)。

表 1 算法检测性能统计

Table 1 Performance statistics of various algorithms

	Detection rate / %	False alarm rate / %	Calculation time / s	Target pixels
DIF	94.0	98.33	0.011	11
BF	97.5	24.52	0.163	10
MMF	88.5	76.35	1.035	4
TDLMS	93.0	35.32	0.945	10
Morphologic	98.0	5.15	0.263	15
Wavelet	76.5	15.18	0.311	12
MSG	99.5	0.50	0.185	18

5 结 论

以单极性红外弱小目标为检测对象, 从目标与背景灰度值的梯度特征出发, 提出了一种红外弱小目标检测的新算法, 能够有效解决复杂背景下弱小目标检测难的问题。从实验结果分析, 可以得出以下结论:

1) 该算法可有效避免大区域缓变背景的影响, 同时对背景杂波边缘处的弱小目标也具有良好的检测效果。

2) 图像分割阈值的选取对检测率和虚警率影响较大。在分割阈值较小时, 检测率高但虚警率大, 反之则检测率低但虚警率小。根据实验统计, 分割阈值设为 25~50 时, 该算法可保证较高的检测率和较低的虚警率。

3) 该算法运算简单、速度快、工程可实现性好, 在复杂背景下对红外弱小目标有着良好的检测效果。

参 考 文 献

- Guan Zhiqiang, Chen Qian, Qian Weixian *et al.*. Infrared target tracking algorithm based on algorithm fusion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 860~865
- 管志强, 陈 钱, 钱惟贤 等. 一种基于算法融合的红外目标跟踪方法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 860~865
- Rich Edmondson, Mike Rodgers, Michele Banish *et al.*. Single-frame image processing techniques for low-SNR infrared imagery [C]. *SPIE*, 2008, **6940**: 69402G
- Mukesh A. Znveri, S. N. Merchant, Uduy B. Desrri. Air-borne approaching target detection and tracking in infrared image sequence [C]. 2004 International Conference on Image Processing, 2004, **10**: 1025~1028
- Xu Jun, Xiang Jianhua, Liang Changhong. Small target detection based on maximum background model in IR images[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(12): 1483~1486
- 徐 军, 向健华, 梁昌洪. 最大化背景模型用于检测红外图像中的弱小目标[J]. *光子学报*, 2002, **31**(12): 1483~1486
- Tarun Soni, James R. Zeidler, Walter H. Ku. Adaptive whitening filter for small target detection[R]. Naval Command Control and Ocean Surveillance Center, 1992
- Cao Yuan, Yang Jie, Liu Ruiming. Detecting infrared small target by using TDLMS filter based on neighborhood analysis[J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2009, **28**(3): 235~240
- 曹 原, 杨 杰, 刘瑞明. 基于邻域分析 TDLMS 滤波器的红外弱小目标检测[J]. *红外与毫米波学报*, 2009, **28**(3): 235~240
- Su Xiuqin, Liang Jinfeng, Lu Tao *et al.*. IR target detection & tracking algorithm based on sea-sky background [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(5): 1309~1312
- 苏秀琴, 梁金峰, 陆 陶 等. 海天复杂背景下红外目标的检测跟踪算法[J]. *光子学报*, 2009, **38**(5): 1309~1312
- John Lai, Jason J. Ford, Peter O' Shea *et al.*. A study of morphological pre-processing approaches for track-before-detect dim target detection [C]. Proceedings of the 2008 Australian Conference on Robotics & Automation, 2008, **12**: 1361~1370
- Wang Wenlong, Han Baojun, Zhang Hongping. A new algorithm of small target detection for infrared image in background of sea and sky[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(3): 725~728
- 王文龙, 韩保君, 张红萍. 一种海空背景下红外弱小目标检测新算法[J]. *光子学报*, 2009, **38**(3): 725~728
- S. Arivazhagan, L. Ganesan. Automatic target detection using wavelet transform [J]. *J. Applied Signal Processing*, 2004, **2004**(17): 2663~2674
- Wu Bin. Research on the Detection of Small and Dim Targets in Infrared Images[D]. Xi'an: Xidian University, 2008. 15~21
- 武 斌. 红外弱小目标检测技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008. 15~21
- Wu Yiquan, Wu Wenyi, Luo Zijuan. Infrared small target detection based on least absolute deviation and genetic algorithm [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2009, **31**(3):

575~578

吴一全, 吴文怡, 罗子娟. 基于最小一乘和遗传算法的红外弱小目标检测[J]. 系统工程与电子技术, 2009, **31**(3): 575~578

- 13 Luo Huan, Wang Fang, Chen Zhongqi *et al.*. Infrared target detecting based on symmetrical displaced frame difference and optical flow estimation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1715~1720

罗 寰, 王 芳, 陈中起 等. 基于对称差分和光流估计的红外弱小目标检测[J]. 光学学报, 2010, **30**(6): 1715~1720

- 14 Luo Huan, Yu Lei, Liao Jun *et al.*. Tracking framework for small infrared multi-target in complex background [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(6): 1536~1541

罗 寰, 于 雷, 廖 俊 等. 复杂背景下红外弱小多目标跟踪系统[J]. 光学学报, 2009, **29**(6): 1536~1541

- 15 Cao Qi, Bi Duyan. Characteristic-selecting filter in infrared small target detection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2408~2412

曹 琦, 毕笃彦. 红外弱小目标检测中的特征选择性滤波方法[J]. 光学学报, 2009, **29**(9): 2408~2412

- 16 Wu Yiquan, Yin Danyan. Detection of small target in infrared image based on background predication by FLS-SVM[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 2806~2811

吴一全, 尹丹艳. 基于 FLS-SVM 背景预测的红外弱小目标检测[J]. 光学学报, 2010, **30**(10): 2806~2811